

---

---

# МЕТАЛЛУРГИЯ. МЕТАЛЛООБРАБОТКА. МАШИНОСТРОЕНИЕ

---

---

УДК 621.924

## ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 12ХН3А ПРИ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИИ

*Доктора техн. наук, проф. БАРШАЙ И. Л., ФЕЛЬДШТЕЙН Е. Э.,  
инж. ГОНЧАРОВ С. П.*

*Белорусский национальный технический университет,  
Зеленогурский технический университет (Польша),  
РУП «МТЗ»*

Повышение конкурентоспособности промышленной продукции, выпускаемой в Республике Беларусь, предопределяет необходимость интенсивного поиска эффективных научно-технических решений по увеличению срока службы машин, механизмов и оборудования за счет разработки и применения высокопроизводительных малоотходных и безотходных, ресурсосберегающих и экологически чистых технологий.

Топография поверхности влияет на прочность деталей, работающих в условиях циклической и знакопеременной нагрузки. Впадины микропрофиля являются своеобразными надрезами на поверхности и в значительной степени влияют на концентрацию напряжений и образование усталостных трещин. Шероховатость поверхностей уменьшает фактическую площадь контакта. Несущая способность детали зависит от шероховатости и метода обработки. Установлено, что 70–80 % вариаций показателей износостойкости связаны с параметрами шероховатости поверхности деталей машин [1]. Коррозия в атмосферных условиях возникает легче и распространяется быстрее на поверхностях, имеющих значительную шероховатость.

Одним из перспективных методов обработки для формирования качества поверхности деталей машин является иглофрезерование. Этот метод обработки характеризуется микрорезанием в зоне взаимодействия режущих элементов с поверхностью детали. В настоящее время научно-исследовательскими и проектными организациями, предприятиями Россий-

ской Федерации, а также США, ФРГ, Японии, Болгарии и других стран разрабатываются основы прогрессивной обработки иглофрезерованием, проектируются и внедряются иглофрезерные станки.

Достигаемая при иглофрезеровании высота микронеровностей находится в пределах  $Ra$  100–0,32 мкм и определяется сочетанием технологических факторов [2–4]. Иглофрезерование в значительной степени аналогично процессам фрезерования и шлифования, так как при всех указанных способах обработки имеет место дискретный контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью. Кроме этого, с фрезерованием иглофрезерование сближает и то, что резание производится металлическими проволоочными элементами, с процессом шлифования – количество режущих элементов, наличие отрицательных углов резания, а иногда и размеры стружки [2, 3]. Важное преимущество иглофрез – их высокая долговечность. В производственных условиях их работоспособность доходит до 2000 ч [3]. Существенное влияние на долговечность иглофрез оказывают конструктивные параметры: диаметр проволоочных элементов; свободная длина элементов; плотность набивки пакета элементов, зависящая от усилия прессования при сборке. Плотность набивки пакета элементов определяется соотношением суммарной площади поперечного сечения всех элементов пакета к площади рабочей поверхности иглофрезы [3]. Предусмотрено изготовление иглофрез с плотностью набивки 70–80 % (ТУ 102-277–80). Особенность геомет-

рии режущих элементов иглофрезы – незначительный радиус закругления режущей кромки, которая в процессе работы самозатачивается (рис. 1). Это обеспечивает при реверсировании вращения инструмента его работу без переточек.

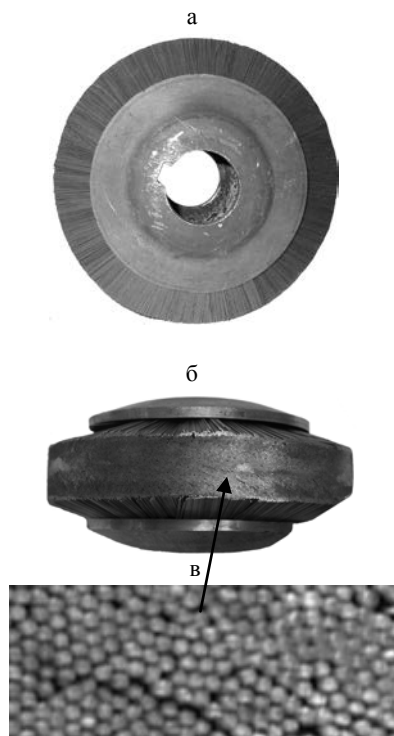


Рис. 1. Иглофреза: а – внешний вид; б и в – рабочая поверхность иглофрезы (х20)

Положительным фактором иглофрезерования является возможность использования металлической стружки, составляющей в отдельных случаях до 5 % массы обрабатываемой детали. Стружку применяют в порошковой металлургии [5, 6]. Это обстоятельство свидетельствует о возможности создания мало- и безотходных процессов изготовления деталей машин в результате применения иглофрезерования.

Имеющиеся данные о процессах в зоне обработки при иглофрезеровании недостаточны и требуют дополнения. Ограничена информация о влиянии режимов обработки на формирование качества поверхности и эксплуатационные характеристики деталей, отсутствуют сведения об управлении данным процессом. Все это сужает возможные области применения иглофрезерования. Потребность в решении комплекса научных, технологических и конструкторских

задач обеспечения качества деталей для широкого применения указанного процесса определяет актуальность данных исследований.

Параметры режима иглофрезерования: скорость резания ( $v$ , м/мин), подача ( $S_{пр}$ , мм/мин), натяг в системе «рабочая поверхность иглофрезы – обрабатываемая поверхность» ( $i$ , мм). Скорость резания – один из основных технологических факторов, определяющих эффективность работы иглофрезы. Этот фактор в основном зависит от вязкости обрабатываемого материала. Параметры иглофрезерования в настоящее время определяют экспериментально в зависимости от конкретных условий и требуемого качества поверхности [4].

Для определения влияния параметров режима иглофрезерования на изменение топографии поверхности использовали математическое планирование эксперимента [7, 8]. При планировании исследований применяли метод ЛП<sub>т</sub>-последовательностей. В этом случае точки реализации экспериментов располагаются в многомерном пространстве таким образом, чтобы их проекции на оси  $X_1 - X_2, X_2 - X_3, \dots, X_i - X_j$  располагались на равном расстоянии друг от друга. Координаты точек рассчитывались из условия  $X_{\min} = 0$  и  $X_{\max} = 1$ . Пример проекции семи точек на оси  $X_1$  и  $X_2$  изображен на рис. 2. Матрица планирования экспериментов (условия проведения) представлена в табл. 1. Реализованные сочетания параметров режима иглофрезерования в соответствии с матрицей планирования приведены в табл. 2.

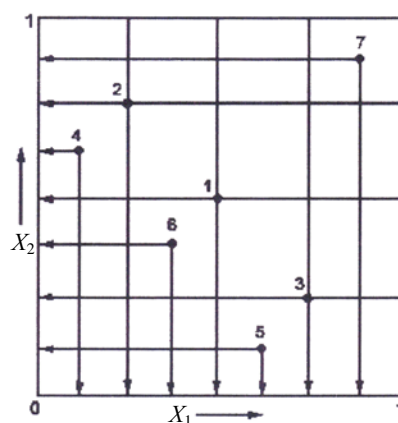


Рис. 2. Проекция семи точек на оси  $X_1$  и  $X_2$

Результаты ранее выполненных исследований [9] позволили выбрать следующие значения параметров режима иглофрезерования, принятые

за основной уровень в данном эксперименте:  
 $v = 330$  м/мин; подачу  $S = 660$  мм/мин и натяг  
 $i = 0,45$  мм.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

Фактор	Точка исследования						
	1	2	3	4	5	6	7
$X_1$	0,500	0,250	0,750	0,875	0,375	0,625	0,125
$X_2$	0,500	0,750	0,250	0,625	0,125	0,37	0,875
$X_3$	0,500	0,250	0,750	0,125	0,625	0,375	0,875

Таблица 2

Условия проведения опытов

Номер опыта	$X_1$ – скорость резания $v$ , м/мин	$X_2$ – подача $S$ , мм/мин	$X_3$ – натяг $i$ , мм
1	169	330	0,22
2	84	530	0,11
3	253	170	0,34
4	295	400	0,06
5	127	85	0,28
6	211	270	0,17
7	42	690	0,39

В тех случаях, когда характер исследуемых зависимостей неизвестен, при решении технологических задач для моделирования исследуемого процесса широко используются уравнения множественной регрессии:

$$y = C \Pi x_i^{m_i} \quad \text{и} \quad y = \exp(b_0 + S b_i x_i).$$

Их можно привести к линейному виду путем логарифмирования с последующим использованием метода наименьших квадратов. В случае применения ЭВМ можно воспользоваться методикой [8]. В этом случае находят матрицу  $\mathbf{X}$ , векторы  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{Y}$  и  $\mathbf{b}$  в виде:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 \dots x_1 \\ \dots \\ 1 \dots x_i \\ \dots \\ 1 \dots x_n \end{bmatrix}; \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \dots \\ Y_i \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ \dots \\ b_i \end{bmatrix}.$$

Тогда:

$$\mathbf{Xb} = \begin{bmatrix} b_0 + b_i x_1 \\ \dots \\ b_0 + b_i x_i \\ \dots \\ b_0 + b_i x_n \end{bmatrix}; \quad \mathbf{y} - \mathbf{Xb} = \begin{bmatrix} y_1 - b_0 - b_i x_1 \\ \dots \\ y_i - b_0 - b_i x_i \\ \dots \\ y_n - b_0 - b_i x_n \end{bmatrix}.$$

Критерий минимизации записывается как

$$(\mathbf{y} - \mathbf{Xb})^T (\mathbf{y} - \mathbf{Xb}) \rightarrow \min.$$

Расчетные значения  $Y$  исследуемой функции равны

$$Y = \mathbf{Xb}.$$

Рассматривая матрицу  $\mathbf{S} = \mathbf{X}^T \mathbf{X}$  и вектор  $\mathbf{X}^T \mathbf{y}$ , можно заметить, что  $\mathbf{S}$  имеет порядок  $2 \times 2$ , а размерность вектор-столбца  $\mathbf{X}^T \mathbf{y}$  равна 2. Таким образом:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} n & \dots & \sum_{i=1}^n x_i \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n x_i & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}^T \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix}.$$

Тогда уравнения метода наименьших квадратов в матричном виде могут быть записаны следующим образом:

$$\mathbf{b} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}.$$

Обработку плоских поверхностей образцов иглофрезерованием выполняли на горизонтально-фрезерном станке 6Н82Г. Использовали иглофрезу диаметром  $D = 150$  мм, шириной  $B = 20$  мм и плотностью набивки проволоочных элементов 75–85 %. Диаметр единичного проволоочного элемента  $d = 0,3$  мм, вылет  $L = 20$  мм. Обработываемый материал – конструкционная сталь: 12ХН3А (ГОСТ 4543–71).

Для оценки шероховатости поверхности после иглофрезерования был использован действующий в настоящее время комплект международных норм, характеризующих геометрическую структуру обработанной поверхности – ISO-3274:1997 и ISO 4287:1998, включающий следующие характеристики: среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$ , высоту десяти точек отклонений от регулярного профиля  $Rz$ , стандартное отклонение профиля  $Rq$ , общую высоту профиля  $Rt$ , максимальную высоту выступов профиля  $Rp$ , максимальную глубину впадин профиля  $Rv$ , среднюю высоту элементов профиля  $Rc$ , среднюю ширину элементов профиля  $RSm$ , относительную опорную длину профиля  $Rmr(c)$ .

Измерение характеристик шероховатости поверхностей образцов до и после иглофрезе-

рования выполняли на компьютеризованном приборе TR-200 (рис. 3).



Рис. 3. Прибор для измерения шероховатости поверхности TR-200

При исследовании топографии поверхности был использован комплекс для микро- и макроанализа поверхности на базе микроскопа МКИ-2М-1 (НПО «Планар») с увеличением до 1200 крат и преобразователя изображения с помощью цифровой камеры «Никон» с разрешением 4,5 млн пиксель и последующей передачей изображения на ЭВМ (рис. 4).



Рис. 4. Комплекс для макро- и микроанализа и топографии поверхности

Анализ результатов эксперимента (рис. 5) свидетельствует о следующем.

Минимальные значения исследуемых высотных характеристик шероховатости поверхности после иглофрезерования получены при параметрах режима обработки:  $v = 295$  м/мин;  $S = 400$  мм/мин;  $i = 0,06$  мм (табл. 1, опыт 4); максимальные – при  $v = 42$  м/мин;  $S = 690$  мм/мин;  $i = 0,39$  мм (табл. 1, опыт 7). Ми-

нимальные значения шаговой характеристики  $RSm$  были зафиксированы в четвертом опыте при обработке на следующих режимах:  $v = 295$  м/мин;  $S = 400$  мм/мин;  $i = 0,06$  мм, максимальные – в опыте 7. Минимум значения относительной опорной длины профиля  $Rmr(c)$  на уровне 50 % был получен в опыте 6 ( $v = 211$  м/мин;  $S = 270$  мм/мин;  $i = 0,17$  мм); максимум – во втором ( $v = 84$  м/мин;  $S = 530$  мм/мин;  $i = 0,11$  мм).

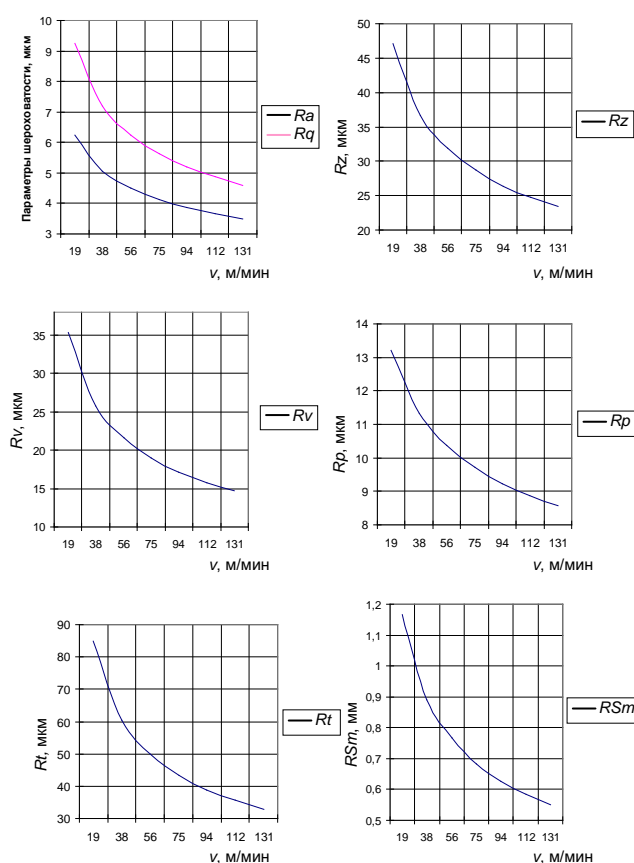


Рис. 5. Влияние скорости резания  $v$  при иглофрезеровании на изменение характеристик шероховатости

После обработки экспериментальных данных были разработаны математические модели влияния параметров режима иглофрезерования на изменения исследуемых характеристик шероховатости поверхности в виде уравнений регрессии (1)–(8). Данные модели позволяют рассчитать значение характеристик шероховатости поверхности при выбранном сочетании параметров режима обработки:

$$Ra = 8,52v^{-0,300}S^{0,126}i^{0,106}; \quad (1)$$

$$Rq = 12,0v^{-0,361}S^{0,170}i^{0,122}; \quad (2)$$

$$Rz = 46,5v^{-0,362}S^{0,226}i^{0,153}; \quad (3)$$

$$Rt = 112v^{-0,489}S^{0,260}i^{0,229}; \quad (4)$$

$$Rp = 14,1v^{-0,224}S^{0,159}i^{0,216}; \quad (5)$$

$$Rv = 35,8v^{-0,455}S^{0,265}i^{0,138}; \quad (6)$$

$$Rc = 1,17v^{-0,491}S^{0,291}i^{0,425}; \quad (7)$$

$$RSm = 3,45v^{-0,389}S^{0,133}i^{0,469}. \quad (8)$$

Графическое изображение моделей (1)–(8) представлено одномерными сечениями функций отклика на рис. 5–7.

Шероховатость обработанной поверхности зависит от динамических углов проволочного элемента иглофрезы ( $\gamma$  и  $\alpha$ ), формируемых в процессе обработки [4]. Значения этих углов определяются упругой деформацией проволочных элементов инструмента. В свою очередь упругая деформация проволочных элементов зависит от параметров режима иглофрезерования. Увеличение значений параметров режима обработки приводит к росту углов  $\gamma$  и  $\alpha$ . Так, в частности, при формировании динамического переднего угла  $\gamma > -20^\circ$  процесс микрорезания переходит в субмикрорезание и пластическое деформирование обрабатываемой поверхности.

Рост скорости иглофрезерования способствует снижению высотных  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rt$ ,  $Rp$ ,  $R\gamma$ ,  $Rq$  и  $Rc$  и шаговой  $RSm$  характеристик шероховатости в 1,5–3,6 раза по сравнению с исходными (до обработки) значениями. Выявленный характер изменения характеристик шероховатости в зависимости от скорости обработки объясняется присущим иглофрезерованию «краевым» эффектом [3]. Этот эффект заключается в следующем. Крайние со стороны обрабатываемой поверхности проволочные элементы (микрорезцы) имеют изгиб в направлении подачи заготовки большой, так как обладают меньшей жесткостью, чем весь пакет проволочных элементов. В результате они формируют микроцарапины (следы своего движения) на обрабатываемой поверхности.

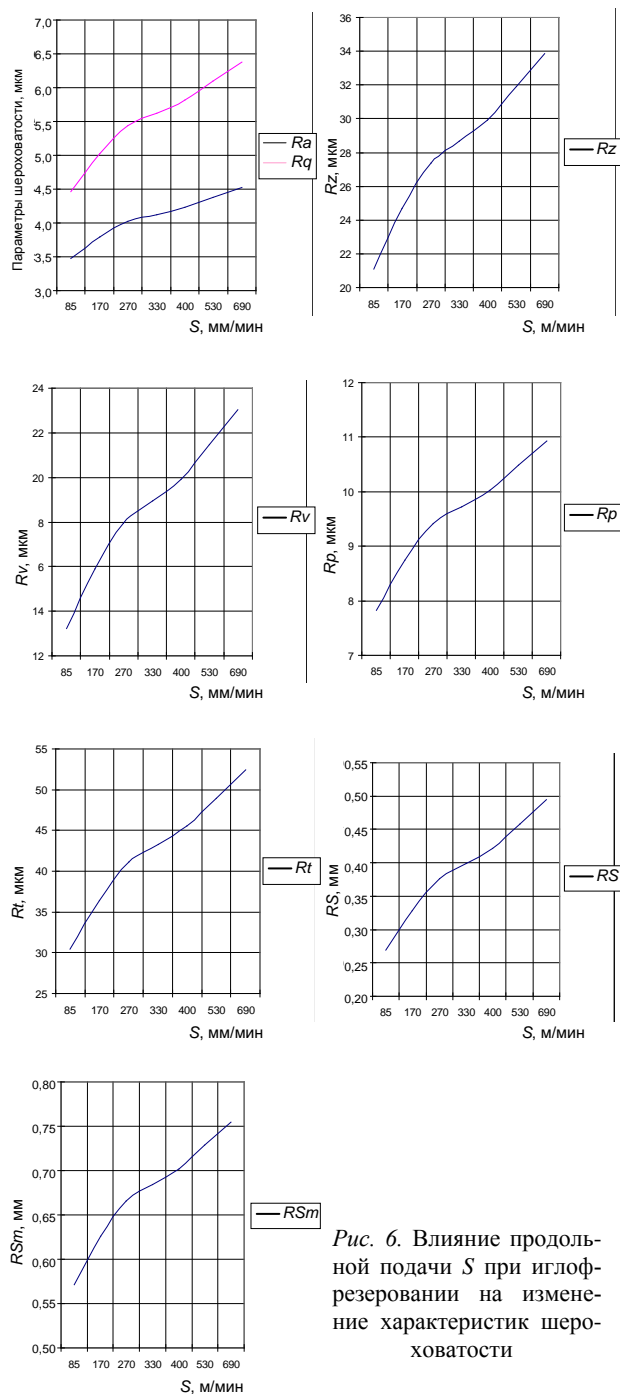


Рис. 6. Влияние продольной подачи  $S$  при иглофрезеровании на изменение характеристик шероховатости

Повышение продольной подачи ведет к увеличению исследуемых характеристик шероховатости. Это объясняется ростом сил резания, увеличением угла упругого деформирования проволочного элемента и переходом процесса субмикрорезания к микрорезанию.

Увеличение натяга  $i$  в системе «обрабатываемая поверхность – рабочая поверхность иглофрезы» способствовало росту всех исследуемых характеристик шероховатости. Рост ука-



занного параметра режима обработки приводит к преобладающему влиянию процесса микро-резания и в меньшей степени пластического деформирования обрабатываемой поверхности, вызываемого ударным воздействием проволочных элементов иглофрезы.

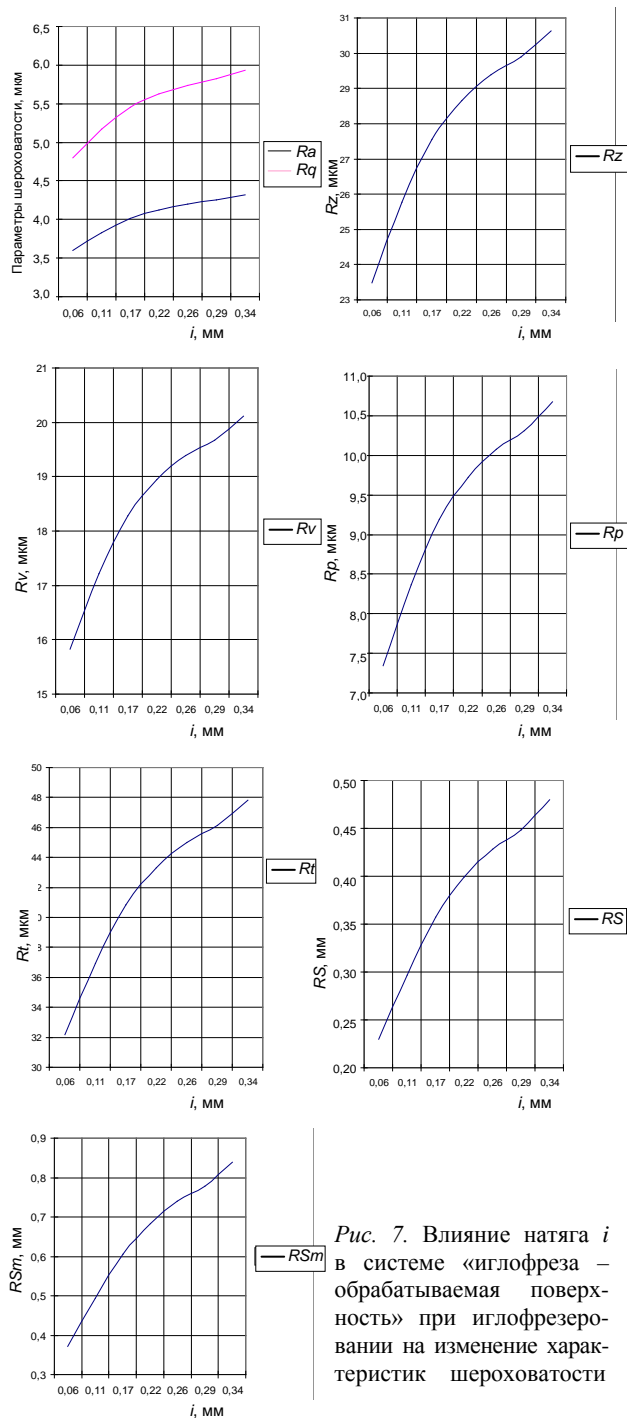


Рис. 7. Влияние натяга  $i$  в системе «иглофреза – обрабатываемая поверхность» при иглофрезеровании на изменение характеристик шероховатости

Минимум значения относительной опорной длины профиля  $Rmr(c)$  на уровне 50 % был получен в опыте 1 – 50 % ( $v = 169$  м/мин;

$S = 330$  мм/мин;  $i = 0,22$  мм). Максимум – 90 % в опыте 6 ( $v = 84$  м/мин;  $S = 530$  мм/мин;  $i = 0,11$  мм).

На рис. 8 представлена топография поверхности образцов из стали 12ХН3А до обработки, а на рис. 9, 10 – после обработки.

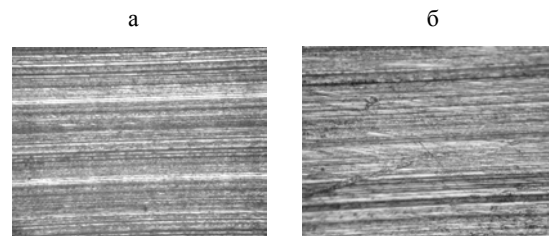


Рис. 8. Фото топографии поверхности образцов из стали 12ХН3А до иглофрезерования: а –  $\times 65$ ; б –  $\times 250$

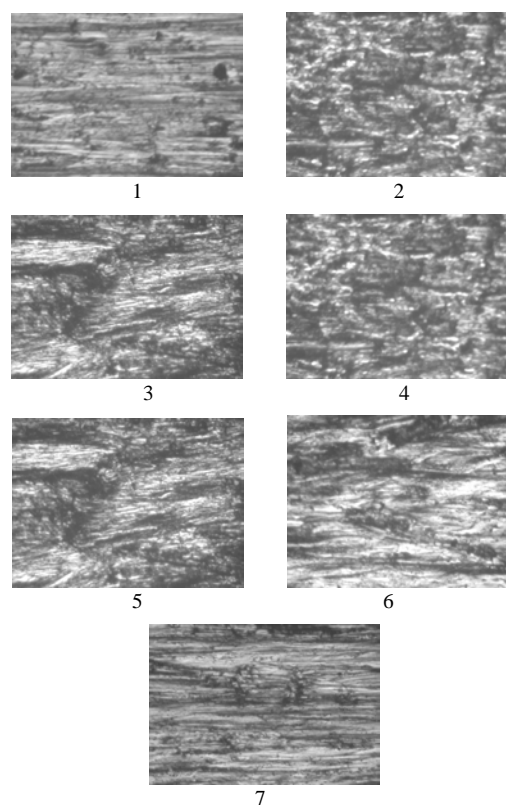


Рис. 9. Фотографии топографии поверхности образцов из стали 12ХН3А после иглофрезерования ( $\times 65$ ) в соответствии с условиями опытов (табл. 2)

Результаты изучения топографии обработанной поверхности позволяют сделать вывод о том, что после иглофрезерования следы от проволочных элементов на поверхности произвольно изменяют свое направление. На поверхности формируются расположенные случайным образом выступы, впадины, риски.

## ЛИТЕРАТУРА

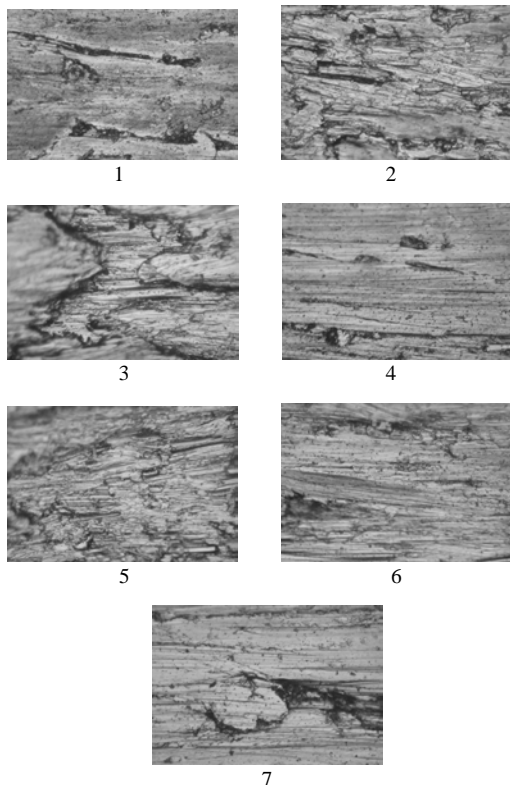


Рис. 10. Фотографии топографии поверхности образцов из стали 12ХН3А после иглофрезерования ( $\times 250$ ) в соответствии с условиями опытов (табл. 2)

## ВЫВОД

Разработанные математические модели позволяют оптимизировать параметры режима иглофрезерования в зависимости от требований к шероховатости поверхности деталей.

1. **Технологические** основы обеспечения качества машин / К. С. Колесников [и др.]; под общ. ред. К. С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

2. **Салуквадзе, В. С.** Иглофрезерная обработка поверхности металлов / В. С. Салуквадзе, В. М. Коптев // Экспресс-информация. Серия ХМ-9. – М.: ЦНИТИхимнефтемаш, 1986. – № 2. – С. 8.

3. **Салуквадзе, В. С.** Изменение свойств в поверхностном слое сплавов при иглофрезерной обработке / В. С. Салуквадзе, И. А. Другова // Расчет, сооружение и эксплуатация магистральных газопроводов. – М.: ВНИИСТ, 1980. – С. 93–102.

4. **Жоров, Ю. С.** Качество поверхности при иглофрезеровании / Ю. С. Жоров, В. А. Балдаев // Механизация тяжелых и трудоемких процессов в судостроении. – Л.: Румб, 1987. – С. 125–132.

5. **Моргулис, А. М.** Повышение эффективности диспергирования металлов методом иглофрезерования / А. М. Моргулис, Л. Н. Корчанова // Технология, организация и экономика машиностроительного производства. – М.: НИИНмаш, 1982. – № 2. – С. 3–4.

6. **Schowoor, W.** Nadelfrasen-Eigenschaften und Ausichten / W. Schowoor, R. E. Koch // Fertigungstechnik und Betrieb. – 1982. – 32. – № 6. – Р. 343–349.

7. **Ящерицын, П. И.** Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск: Вышэйш. шк., 1985. – 286 с.

8. **Поллард, Д.** Справочник по вычислительным методам статистики / Д. Поллард; пер. с англ. В. С. Западворова. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.

9. **Баршай, И. Л.** Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при обработке в условиях дискретного контакта с инструментом / И. Л. Баршай. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 244 с.

Поступила 2.02.2007

УДК 662.7

## РАСЧЕТ ПОЛНОТЫ РЕАКЦИЙ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВОДОУГОЛЬНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ

Канд. техн. наук, доц. НАЗАРОВ Н. С., инж. НАЗАРОВ И. Н.

Белорусский национальный технический университет

В [1] показано, что водоугольная газификация (ВУГ) углерода твердого топлива высокотемпературным паром, или (что одно и то же) разложение воды (высокотемпературного пара)

углеродом твердого топлива, описывается тремя химическими уравнениями:

